

протоколов БСС для пары ZigBee и WirelessHART (по методике «посредника»). Архитектура эмулятора представляет первый шаг к программной реализации предложенного решения вопроса совместимости стандартов беспроводных сенсорных сетей. Дальнейшая работа будет сосредоточена на реализации этой архитектуры на языке программирования Python и исследование эффективности эмулятора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Юсеф Ф., Сосенушкин С.Е. Методика обеспечения интероперабельности беспроводных сенсорных сетей на основе унификации форматов кадров // Вестник МГТУ СТАНКИН. – 2022., № 61. – С. 38 – 42.
2. Юсеф Ф. Обеспечение интероперабельности стандартов ZigBee, Wi-Fi и WirelessHART на основе унификации форматов кадров // Научная инициатива иностранных студентов и аспирантов. Сборник докладов II Международной научно-практической конференции. – 2022. – С. 671– 676.
3. Юсеф Ф., Сосенушкин С.Е. Сравнительный анализ методик обеспечения интероперабельности стандартов беспроводных сенсорных сетей // Сборник докладов МАШИНОСТРОЕНИЕ: традиции и инновации (МТИ – 2022). – 2022. – С.329 – 335.

Ян Сяньчжэ (Китай)

Томский политехнический университет, г. Томск

Научный руководитель: Федорищева Марина Владимировна,
канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник

ПОВЕРХНОСТНАЯ МОДИФИКАЦИЯ СТРУКТУРЫ ТРУБОПРОВОДНЫХ СТАЛЕЙ ВАКУУМНЫМИ МЕТОДАМИ С ЦЕЛЬЮ УВЕЛИЧЕНИЯ КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ

Введение

Детали и конструкции из низкоуглеродистой стали требуют дополнительной защиты от коррозии при эксплуатации в особо тяжелых условиях. Наиболее часто такая защита заключается в нанесении на поверхность защищаемых конструкций слоев покрытий на основе органических и неорганических материалов или металлов различными методами. Покрытия, полученные таким способом, обладают существенными недостатками. Защитные пленки, получаемые этими методами, часто бывают пористыми и рыхлыми, как, например, золь-гель

технология и электрохимическая технология, для которых характерна плохая адгезия. При этом происходит наводороживание поверхностного слоя детали, что приводит к охрупчиванию материала. Одним из методов решения вышеперечисленных проблем является получение антикоррозионных покрытий с помощью современной вакуумной технологии, позволяющей формировать многослойные покрытия для достижения заданных функциональных свойств. В работах [1-3] установлена эффективность имплантации против коррозии, но не достаточно изучены химические изменения, происходящие в поверхностном слое при имплантации, приводящие к повышению коррозионной стойкости.

Целью работы является исследование влияния алюминия, бора и кислорода, имплантированных в низкоуглеродистую сталь на устойчивость к коррозионному воздействию.

Материалы и методы

В качестве исследуемого объекта выбрана низкоуглеродистая сталь 09Г2С, толщиной 1мм, из которой готовили образцы, общей площадью 2см².

Перед имплантацией образцы обрабатывали механически: шлифовали и полировали до шероховатости Ra = 0,08 мкм.

Имплантация поверхности осуществляли при помощи вакуумной установки UVN-05MD «КВАНТ», оснащенной имплантерами «Диана» и «Дионис». В качестве имплантированных ионов использовали алюминий, бор и кислород, причем алюминий и бор имплантировали одновременно в атмосфере инертного газа на установке «Дионис», для чего использовали соответствующую мишень. Имплантацию кислородом осуществляли до имплантации алюминия и бора на установке «Диана». Для получения оксидов с элементами матрицы, образование которых приводит к повышению коррозионной стойкости модифицированной поверхности, проводят при 30% концентрации кислорода, при этом доза составляет 1×10^{18} ион/см². Имплантацию ионов алюминия и бора проводили при ускоряющем напряжении 80 кВ с дозой имплантации 1×10^{17} ион/см², поскольку меньшее значение ускоряющего напряжения не приводило к внедрению ионов Al и B.

Для анализа коррозионных характеристик образцов применяли потенциодинамическую поляризацию на потенциостате Р-40Х с использованием программного обеспечения ПО-ES8 и приложения для обработки импедансных спектров Eissa1. Испытания проводились с использованием трехэлектродной электрохимической ячейки с хлорсеребряным электродом сравнения и графитовым противозлектро-

дом в 3,5 мас. % NaCl. В качестве рабочего электрода выступал образец с покрытием или без обработки. Потенциодинамическую поляризацию проводили со скоростью сканирования 1 мВ/с в диапазоне потенциалов от -1 В до +0,4 В. Для установления равновесного потенциала образец выдерживали в растворе около 40 минут. ЭИС проводили при потенциале холостого хода в диапазоне частот от 100 000 Гц до 0,05 Гц с потенциалом возмущения 10 мВ.

Морфологию поверхности исследовали методом растровой (сканирующей) электронной микроскопии на приборе LEO EVO-50 XVP (РЭМ). Основан на принципе взаимодействия электронного пучка с объектом исследования.

Результаты и обсуждение

Потенциодинамическая поляризация проводится для оценки коррозионных свойств. Вычислены потенциалы коррозии (E_{cor}) и плотности тока коррозии (I_{cor}), полученные из кривых Тафеля (таб.1). Чем выше коррозионный потенциал, тем меньше склонность к коррозии и тем лучше коррозионная стойкость. Между тем, чем меньше плотность тока коррозии, тем ниже скорость коррозии и выше коррозионная стойкость. Образец после обработки показывает $E_{cor} = -0,446$ В, что выше, чем у трубопроводной стали ($E_{cor} = -0,561$ В), что свидетельствует о лучшей коррозионной стойкости. После обработки поверхности стали ионами кислорода, алюминия и бора плотность тока коррозии показывает отрицательный сдвиг по сравнению с исходной низкоуглеродистой сталью, подтверждая, что скорость коррозии после имплантации является наименьшей. Результаты убедительно доказывают, что имплантация повышает коррозионную стойкость.

Таблица 1

Потенциалы коррозии (E_{cor}) и плотности тока коррозии (I_{cor})

Образцы	E_{cor} (В)	I_{cor} (мкА/см ²)
Сталь без обработки	-0,561	4,8
Сталь после имплантации	-0,446	2,6

В исходном состоянии сталь 09Г2С имеет феррито-перлитную структуру со средним размером зерен феррита 10-20 мкм. Методом растровой электронной микроскопии исследована низкоуглеродистая сталь в исходном состоянии и имплантированная ионами кислорода, алюминия и бора после коррозионных испытаний. На рисунке 2 приведены изображения, полученные методом РЭМ. Видно, что исходная сталь при одном и том же режиме испытаний имеет глубокие ямки и

дефекты, в то время как сталь обработанная ионами кислорода, алюминия и бора имеет достаточно однородную структуру без видимых дефектов и изъявлений.

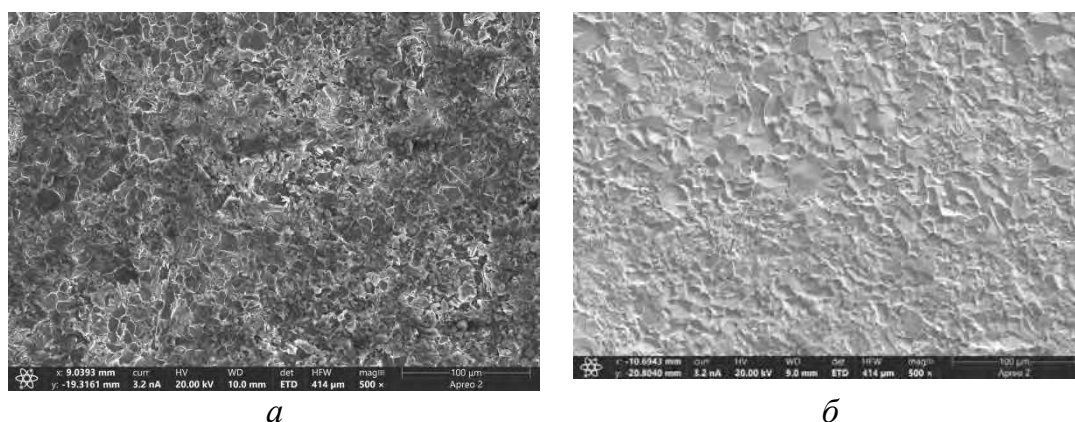


Рис. 2. РЭМ изображения морфологии поверхности низкоуглеродистой стали в исходном состоянии и имплантированной ионами кислорода, алюминия и бора после коррозионных испытаний.

Вывод

Таким образом, методами потенциодинамической поляризации установлено, что коррозионная стойкость низкоуглеродистой стали увеличивается результате двухстадийной имплантации ионов кислорода и одновременно ионов алюминия и бора. Исследования методом растровой электронной микроскопии показали, что поверхность стали после имплантации ионами кислорода алюминия и бора однородна, без видимых дефектов, что способствует увеличению коррозионной стойкости низкоуглеродистой стали.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Behrouz Bahadormanesh, Mohammad Ghorbani. Ni-P/Zn-Ni compositionally modulated multilayer coatings – Part 2: Corrosion and protection mechanisms // *Applied Surface Science*. – 2018. – Vol. 442. P. 313–321, DOI:10.1016/j.apsusc.2018.02.130.
2. Wang H.W., Stack M.M., Lyon S.B., Hovsepian P., Munz W.D. The corrosion behaviour of macroparticle defects in arc bond-sputtered CrN/NbN superlattice coatings // *SURFACE & COATINGS TECHNOLOGY*. - 2000. - Vol. 2-3. P. 279-287 DOI: 10.1016/S0257-8972(00)00554-5.
3. Leppäniemi Jarmo et al., Corrosion protection of steel with multilayer coatings: Improving the sealing properties of physical vapor deposition CrN coatings with Al₂O₃/TiO₂ atomic layer deposition nanolaminates // *Thin Solid Films*. - 2017. - Vol. 627. P. 59–68, DOI: 10.1016/j.tsf.2017.02.050.